2003—2022年昆仑山北坡典型湖泊水位变化及其归因

刘玉婷[1]，　陈亚宁[2]，　朱成刚[2]，　张淑花[3]，　黄心垚[1]

（1. 喀什大学生命与地理科学学院/新疆维吾尔自治区帕米尔高原生物资源与生态重点实验室，
新疆 喀什　844000；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，
新疆 乌鲁木齐　830011；3. 西安科技大学测绘科学与技术学院，陕西 西安　710000）

摘　要： 湖泊水位变化是湖泊系统动态变化的重要指标，对湖泊生态环境和水资源管理具有重要意义。基于ICESat-1、CryoSat-2、EnviSat以及ICESat-2多源测高卫星提取2003—2022年阿克赛钦湖、阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖、长虹湖、萨利吉勒干南库勒湖的水位、湖泊集水区气温、降水及土地利用数据，利用趋势分析、Mann-Kendall和Pearson相关性等方法，定量分析湖泊水位变化特征，探讨湖泊水位变化的影响机制。结果表明：(1) 多源测高卫星水位与水位数据集进行精度检验，变化趋势一致且相关性分析均通过显著性F检验。(2) 近20 a，除萨利吉勒干南库勒湖外，其余湖泊水位呈显著上升趋势，长虹湖水位上升速率最大，以0.71 $m \cdot a^{-1}$的速率变化，阿克赛钦湖水位上升速率最小，以0.29 $m \cdot a^{-1}$的速率变化。(3) 湖泊集水区气候要素差异较大，气温都呈上升速率的变化而降水量变化不一，而阿其克库勒湖、阿牙克库木湖、鲸鱼湖水位与降水呈正相关，除萨利吉勒干南库勒湖，典型湖水位与气温正相关。利用多源测高卫星数据，对湖泊水位变化进行分析，旨在揭示昆仑山北坡湖泊的水文变化规律，并为湖泊生态环境管理提供科学依据。

关 键 词： 卫星测高；湖泊水位；气温；降水；土地利用；昆仑山北坡

文章编号： 1000－6060(2024)11－1805－11(1805～1815)

湖泊是自然资源与水循环重要的组成部分[1]，而高山湖泊由于其独特的地理位置和生态环境，在保持生态平衡、调节气候等方面扮演着重要角色[2-3]。昆仑山北坡的高山湖泊多为内陆咸水湖，具有独特的自然景观和生态环境[4-5]。因此，充分认识昆仑山北坡湖泊的变化及驱动因素，可为高山区域的生态环境保护和水资源管理提供科学依据。

湖泊水位作为监测湖泊水资源变化的重要指标之一[6]，在卫星测高技术尚未发展前，多采用在地面水文站点连续观测的方法获取湖泊的水位信息，但受限于湖泊位置偏远、当地经济条件相对落后、缺少人员等，在湖泊周边建立观测站点并进行长期观测具有一定困难[7-8]。近年来，用不同测高卫星对流域以及湖泊进行水域的高程、水位测量以求得多年水位变化趋势与气候关系的研究已逐步开展，为监测湖泊水位变化提供了便利且精确的手段[9-11]。Jiang等[12]融合Topex/Poseidon（TP）EnviSat、Jason、CryoSat-2、Sentinel-3等多种卫星测高数据在山区湖泊水位监测中的综合应用。Xu等[13]利用ICESat和CryoSat-2的测高数据，研究了青藏高原湖泊水位的季节趋势和周期。田时岳等[14]利用ICESat-2计算鄱阳湖水位数据，且用实测数据验证测高卫星数据精度较高。

本文以2020年昆仑山北坡大于50 km^2的中大型湖泊为研究对象，利用ICESat-1、CryoSat-2、EnviSat/RA-2以及ICESat-2测高数据，对典型湖泊的水位变化进行监测研究，探讨湖泊集水区内气候因子和土地利用的时空变化特征，以及湖泊水位对气候

收稿日期： 2024-03-18；　**修订日期：** 2024-05-11

基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0100)；新疆自治区科技计划项目(2021D01B05)资助

作者简介： 刘玉婷(1986-)，女，博士，副教授，主要从事资源利用与生态安全研究. E-mail: liuyuting@ksu.edu.cn

通讯作者： 陈亚宁(1958-)，男，博士，研究员，主要从事干旱区生态水文研究. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

因子、土地利用的响应机制,旨在揭示昆仑山北坡湖泊的水文变化规律,为未来的环境保护和资源管理提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

昆仑山北坡(35°~39°N,80°~94°E)位于中国西北部,地形复杂,包括山地、高山峡谷、高原和河谷等地貌类型,地势起伏,海拔1530~6738 m(图1)。该区域属于高寒山地气候,气候寒冷干燥,冬季长且寒冷,夏季短暂而凉爽,降水集中在夏季,冬季降水较少[15]。昆仑山北坡包括高山云杉林、高山草甸和高山湖泊等生态系统,这些生态系统对于维护地区生物多样性具有重要意义[16]。阿牙克库木湖(37°31′N,89°28′E)位于青藏高原北部边缘——阿尔金山与昆仑山流域区内,是中国十大湖泊之一。阿其克库勒湖(37°04′N,88°23′E)、鲸鱼湖(36°19′N,89°26′E),与阿牙克库木湖地理位置相近,均位于阿尔金山自然保护区内。长虹湖(36°02′N,85°58′E)位于昆仑山区,湖水面积相对较小。阿克赛钦湖(35°12′N,79°52′E)是东羌塘高原新疆一侧的最大天然湖泊,东北靠昆仑山脉,西南临昆仑山支脉阿克赛钦塔格山。萨利吉勒干南库勒湖(34°40′N,79°41′E)属咸水湖,位于喀喇昆仑山与希罗克宗山之间的盆地内。

1.2 数据来源

(1) 多源测高卫星

本文测高卫星选用EnviSat、ICESat-1、CryoSat-2与ICESat-2卫星所记录数据作为数据来源(表1)。EnviSat,参考椭球为WGS84,大地水准面模型为EGM2008,为获取所有地表类型上的地球物理参数,4种波形重跟踪算法(Ocean、Ice-1、Ice-2和Sea-Ice)同时运行,其中Ice-1算法更适合内陆水体提取。ICESat-1,基于Tope/Poseidon坐标,EGM2008水准面,用于科学研究的数据产品有15种(GLA01,GLA02,…,GLA15),采用GLA14 Version34测高数据。CryoSat-2,参考椭球为WGS84,大地水准面模型为EGM96,搭载了先进的合成孔径雷达测高仪(SIRAL),测量模式为低分辨率模式(LRM)、合成孔径雷达模式(SAR)以及合成孔径雷达干涉测量模式(SIRAL)。ICESat-2数据产品为Level-1、Level-2、Level-3A和Level-3B共4个级别,研究使用的是Level-3A级别,适用于内陆水体高程研究的ATL13 Version1。

(2) 其他数据

数字高程模型(DEM)数据来源于USGS/GTOPO30,分辨率30″,用于提取湖泊的集水区。2000、2005、2010、2015、2020年30 m分辨率土地利用数据,来源于中国科学院资源与环境科学数据中心。2001—2020年的月尺度的降水、气温来源于ERA5-land数据集,空间分辨为0.1°。阿克赛钦湖、阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖水位参考数据集来源于参考文献[17],其依据卫星观测数据计算而来。

1.3 研究方法

1.3.1 水位计算 利用多源测高卫星的基本工作原理,计算卫星测高水位(H,m),湖泊水位计算公式如下[18]:

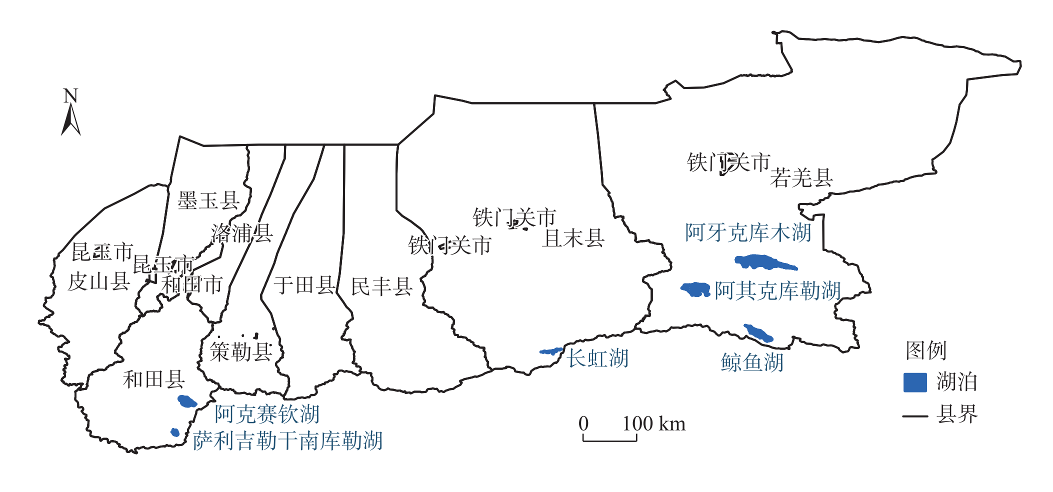


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表1　多源测高卫星参数

Tab. 1　Parameters of multi-source altimetry satellites

搭载卫星	高度计	使用年份	波段	重复周期/d	足迹/km
EnviSat	RA-2	2002—2012	Ku、S	35	1.7
ICESat-1	GLAS	2003—2009	激光	183	0.07
CryoSat-2	SIRAL	2010—2022	Ku	369,30	1.6
ICESat-2	ATLAS	2018—2022	激光	91	0.017

$$H = h_{alt} - h_{ran} - h_{cor} - h_{geoid} - \Delta r \tag{1}$$

$$\Delta r = r_{iono} + r_{dry} + r_{wet} + r_{set} + r_{pol} \tag{2}$$

式中：h_{alt}为卫星相对参考椭球高度(m)；h_{ran}为卫星到星下点(地面)观测距离(m)；h_{cor}为修正后距离(在不进行波形重跟踪时，该项不计)(m)；h_{geoid}为大地水准面高度(m)；Δr为地球物理环境修正；r_{iono}为电离层修正(m)；r_{dry}为对流层修正(m)；r_{wet}为对流层修正(m)；r_{set}为球固体潮修正(m)；r_{pol}为地球极潮修正(m)。

每个星载高度计计算的湖泊水位点中，会有一些异常值偏差很大，对单日湖泊水位值及后期的湖泊水位分析造成极大的误差，首先需要人工目视解译剔除明显异常值，然后与总体水位平均值作差，最后目视解译剔除明显异常值[19]。对于每一天的数据，采取2.5σ准则剔除异常值，并对剔除后的水位值做平均处理，得到湖泊单“日”水位高程[20-21]。

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \tag{3}$$

$$V_i = X_i - \bar{X} \tag{4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} V_i^2}{n}} \tag{5}$$

式中：n为整体剔除后的日水位点个数；X_i为第i个水位点处的水位值(m)；$\bar{X}$为水位均值(m)；V_i为第i个水位点处的剩余误差(m)；σ为标准差(m)。当$\left|X_i - \bar{X}\right| > 2.5\sigma$时，剔除$X_i$。基于平均值获取的湖泊单“日”水位值仍然会存在一些较小的异常值，需要再次进行异常值剔除，得到更为准确的逐日水位。

1.3.2　Mann-Kendall方法　Mann-Kendall方法是一种常用的非参数统计检验方法，用于判断水位时间序列的趋势变化，此方法不需事先知道数据服从何种分布[22]，构建水位时间序列$\{X_1, X_2, \cdots, X_n\}$。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sign}\left(X_j - X_i\right) \tag{6}$$

$$\mathrm{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1, X_j - X_i > 0 \\ 0, X_j - X_i = 0 \\ -1, X_j - X_i < 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中：n为水位时间序列长度；S为统计变量，其均值为0；X_i、X_j分别为时间序列中第i个和第j个水位值。

当n>10时，标准正态统计变量(Z)表示为：

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{8}$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sigma}, S > 0 \\ 0 \qquad, S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sigma}, S < 0 \end{cases} \tag{9}$$

式中：σ为标准差。当Z>0时，表示水位呈增加变化趋势，反之，呈减小趋势。当$|Z|\geqslant 1.96$时，通过了α=0.05的显著性检验；当$|Z|\geqslant 2.58$时，通过了α=0.01的显著性检验。

1.3.3　变异系数分析　变异系数(C_v)是一种用于衡量数据离散程度的统计量[23]，计算公式如下：

$$C_v = \frac{\sigma}{|\mu|} \tag{10}$$

式中：σ、$|\mu|$分别为气象要素的标准差、平均值。

1.3.4　Pearson相关性分析　采用Pearson相关性分析的方法，分析湖泊集水区内气候因子与水位的相关性，计算公式如下[24]：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - \bar{K})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt[2]{\sum_{i=1}^{n}\bar{K}^2\sum_{i=1}^{n}\bar{Y}^2}} \tag{11}$$

式中：r为相关系数；n为样本数目；K_i为第i年水位数据；$\bar{K}$为水位均值；Y_i为第i年的气候子(气温、降水)数据；$\bar{Y}$为气候因子均值。

2　结果与分析

2.1　湖泊水位数据验证

依据湖泊面积边界，从ICESat-1、CryoSat-2、EnviSat以及ICESat-2测高数据提取阿克赛钦湖、阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖水位。并将提取的水位与湖泊表面高度数据集进行对比，比较典型湖水位的变化趋势，并评估其精度和可靠性(图2)。研究发现，本研究所提取的湖泊水位数据与水位数据集的变化趋势较为一致。

通过计算提取水位与水位数据集的相关系数、

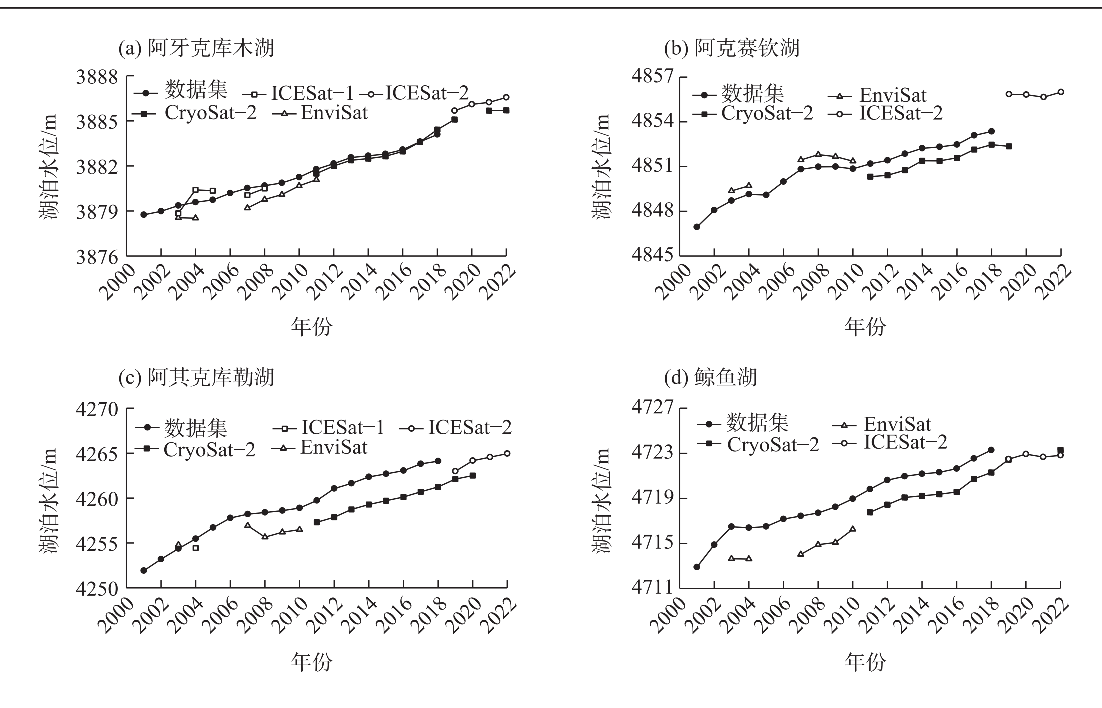


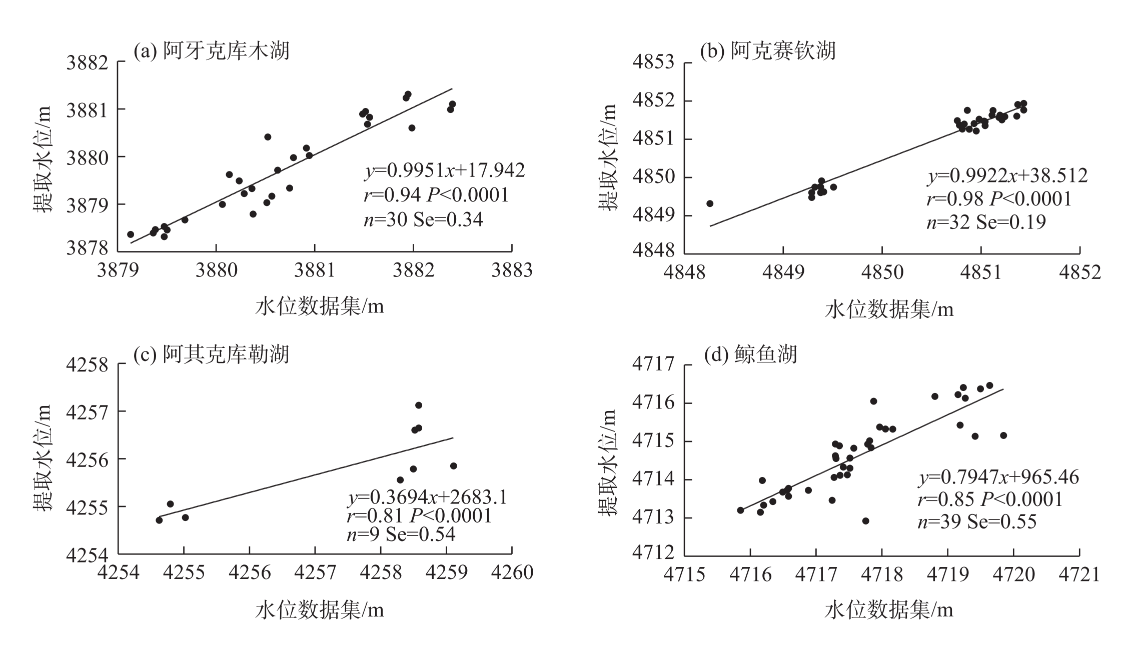
图2 提取湖泊水位与水位数据集趋势分析

Fig. 2 Trend analysis of extracted lake water level and water level datasets

估计标准误差(Se)、F显著性检验,来衡量提取水位值的可靠性(图3)。阿牙克库木湖、阿克赛钦湖提取水位数据与水位数据集线性关系较显著,相关系数r均大于0.9,估计标准误差分别为0.34、0.19,得出提取的水位数据较为可靠,具有应用价值。鲸鱼湖、阿其克库勒湖相关系数r均大于0.8,估计标准误差分别为0.55、0.54,可为湖泊水位数据趋势变化提供参考依据。

2.2 典型湖泊水位变化

水位变化趋势分析是对湖泊水位变化规律的定量研究,采用线性回归分析方法,对湖泊水位变化数据进行趋势分析,并利用Mann-Kendall、F显著



注:r为相关系数;n为检验样本数;Se为标准误差。

图3 提取湖泊水位数据可靠性验证

Fig. 3 Reliability verification of extracted lake water level data

性检验方法对结果进行统计检验。通过对多源测高卫星数据的处理与分析，得到昆仑山北坡典型湖泊水位的变化数据（图4）。2003—2022年，除萨利吉勒干南库勒湖外，典型湖泊的水位均呈显著上升趋势。

长虹湖水位速率变化最大，以0.71 $m\cdot a^{-1}$的速率显著上升，2015、2021年湖泊水位呈负增长，其余年份湖泊水位均为正增长，水位由2011年的4908.63 m上升至2022年的4915.46 m，上升了6.83 m。水位上升速率变化第二位的是鲸鱼湖，以0.57 $m\cdot a^{-1}$速率显著上升，仅在2004、2021年湖泊水位呈负增长，水位由2003年的4713.64 m上升至2022年的4723.06 m。阿其克库勒湖水位以0.55 $m\cdot a^{-1}$的速率显著上升，水位由2003年的4254.80 m上升至2022年的4264.94 m，水位上升了10.14 m，也仅在2004、2008年湖泊水位呈负增长。阿牙克库木湖水位以0.40 $m\cdot a^{-1}$的速率显著上升，2009、2021年湖泊水位呈负增长，湖泊水位由2003年的3878.70 m上升至2022年的3886.13 m。水位显著上升速率最小的为阿克赛钦湖，以0.29 $m\cdot a^{-1}$速率上升，2003—2022年湖泊水位负增长的有5 a（2009、2010、2011、2015、2021年），湖泊水位由2003年的4849.38 m上升至2022年的4856.00 m。萨利吉勒干南库勒湖水位变化与其他湖泊存在显著差异，其湖水位变化不显著，湖泊水位由2003年的5193.42 m上升至2021年的5195.42 m，上升了2.00 m，2003—2021年湖泊水位正增长的有6 a（2009、2014、2016、2018、2019、2020年），其余年份湖泊水位均为负增长。

2.3 水位变化主要影响因素

2.3.1 降水和气温变化 气候变化的空间特征对不同地区的生态环境和资源利用产生了深远影响，以昆仑山北坡典型湖泊集水区为研究对象，探讨湖泊

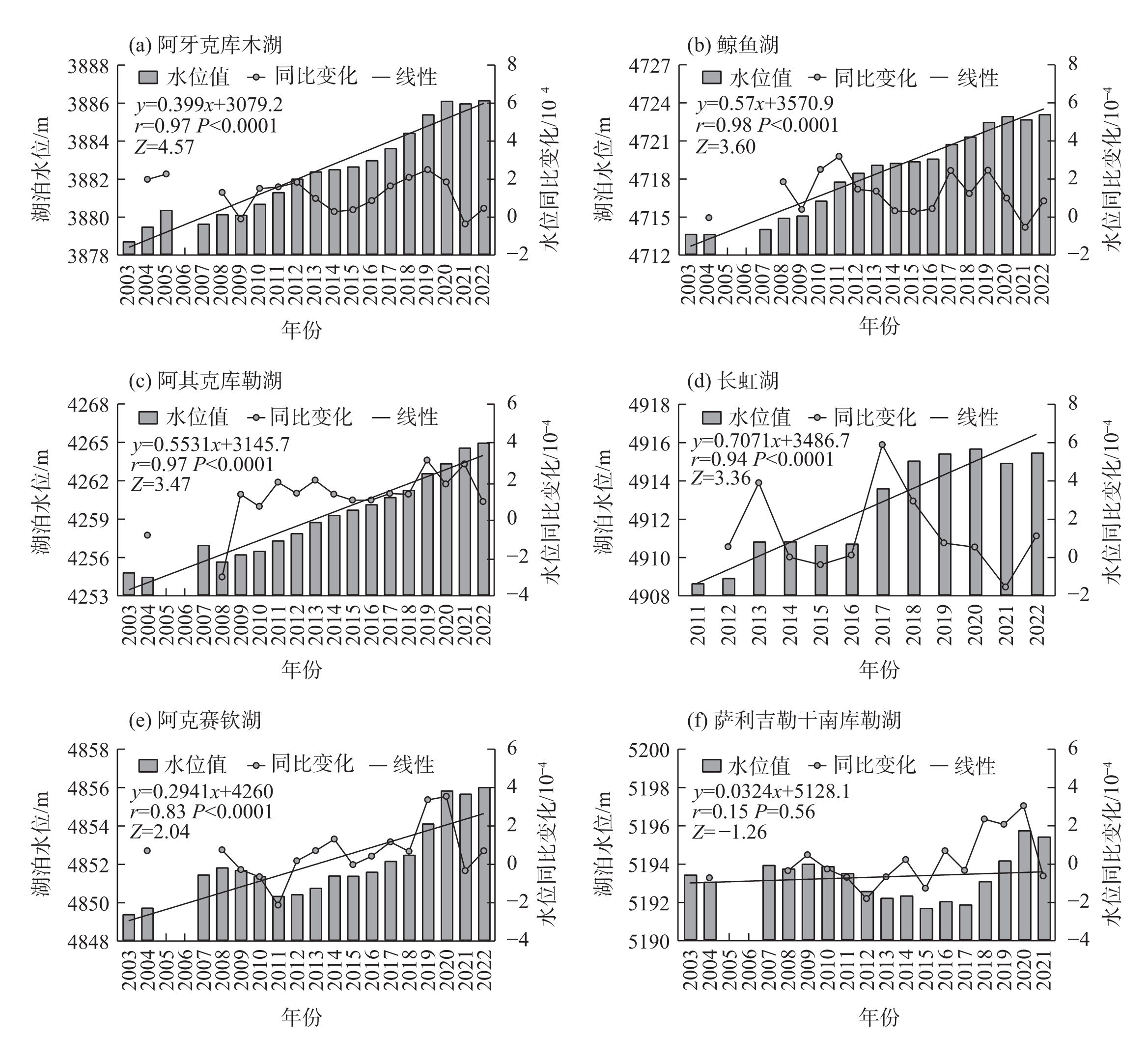


图4　湖泊水位的年际变化

Fig. 4　Interannual variation of lake water level

集水区内气候因素变化,如表2、图5所示。萨利吉勒干南库勒湖集水区以汇流累积量1000为界进行划分,其余湖泊集水区以汇流累积量5000为界且依据水系进行提取。2001—2022年典型湖泊集水区内气温变化、降水时空变化存在差异,阿牙克库木湖气温最高为-3.816±0.532 ℃,萨利吉勒干南库勒

表2 2001—2022年湖泊集水区气候要素统计

Tab. 2 Statistics of climate factors in lake catchment areas from 2001 to 2022

湖泊	平均气温/℃	年降水量/mm	气温变化/℃·(10a)$^{-1}$	年降水量变化/mm·(10a)$^{-1}$
阿牙克库木湖	−3.816±0.532	306.173±51.012	0.172(0.140)	1.249(0.167)
鲸鱼湖	−8.765±0.573	417.392±34.337	0.263(0.065)	0.224(0.082)
阿其克库勒湖	−8.479±0.683	454.508±50.439	0.330*(0.081)	10.980(0.111)
长虹湖	−8.528±0.572	389.031±36.497	0.267(0.067)	−6.682(0.094)
阿克赛钦湖	−9.924±0.643	282.526±36.000	0.337*(0.065)	−6.515(0.127)
萨利吉勒干南库勒湖	−10.457±0.757	292.577±43.186	0.355**(0.072)	−5.880(0.148)

注:*、**分别表示通过了0.1、0.05显著性水平检验;括号中数值表示变异系数。

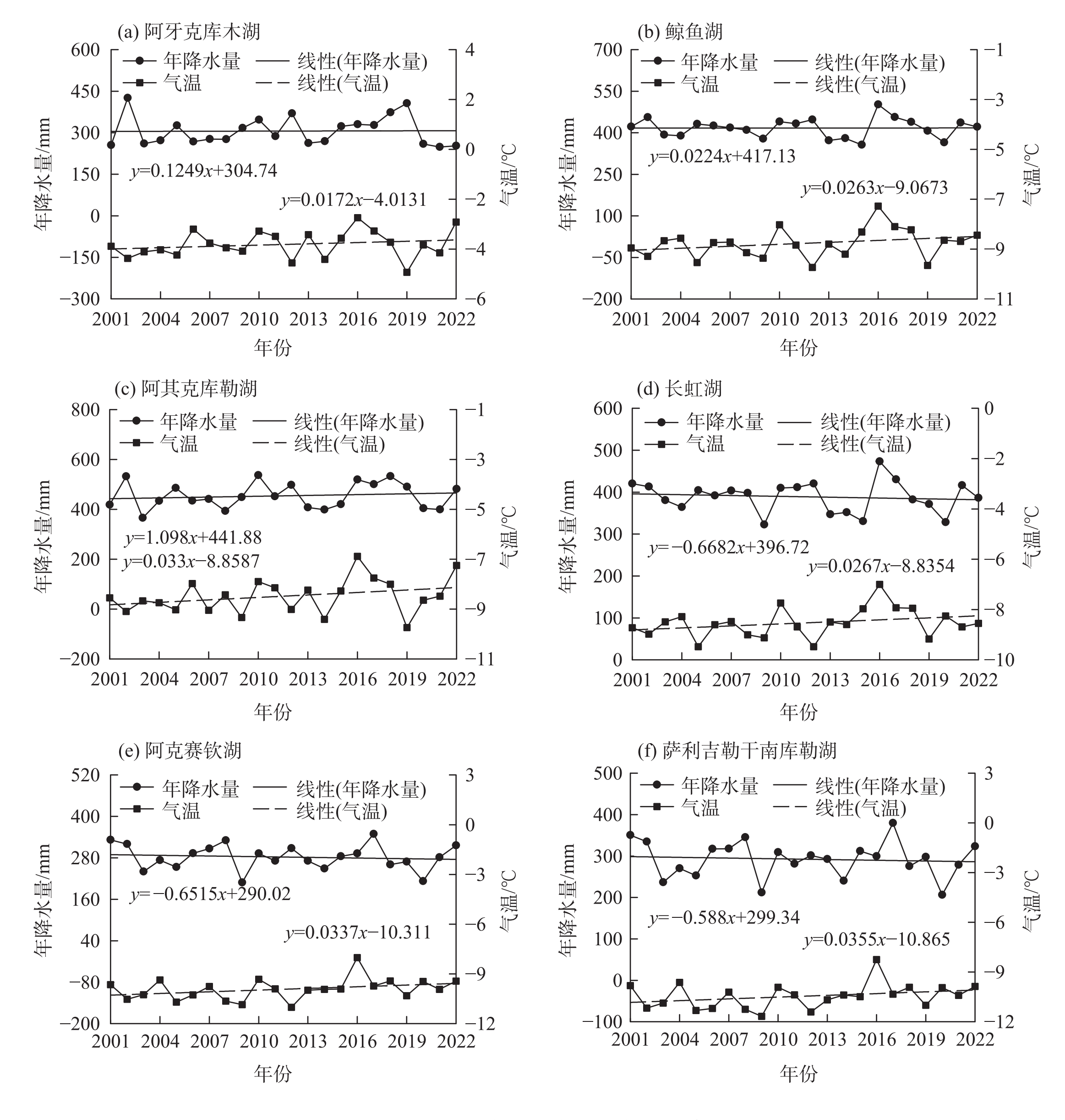


图5 2001—2022年湖泊集水区气候要素变化

Fig. 5 Changes in climate factors in lake catchment areas from 2001 to 2022

湖气温最低为−10.457±0.757 ℃。阿其克库勒湖年降水量最高454.508±50.439 mm，其次为鲸鱼湖，年降水量417.392±34.337 mm，阿克赛钦湖年降水量最低282.526±36.000 mm。

2001—2022年典型湖泊集水区内气温上升，升温率最高的为萨利吉勒干南库勒湖，以0.355 ℃·(10a)$^{-1}$的速率上升，阿牙克库木湖气温上升速率较缓慢，以0.172 ℃·(10a)$^{-1}$的速率变化。2001—2022年典型湖泊集水区内年降水量时空变化存在一定差异，阿牙克库木湖、鲸鱼湖、阿其克库勒湖降水呈增加趋势，降水增加率分别为1.249 mm·(10a)$^{-1}$、0.224 mm·(10a)$^{-1}$、10.980 mm·(10a)$^{-1}$，与之变化相反的长虹湖、阿克赛钦湖、萨利吉勒干南库勒湖降水量呈减少趋势，减少率分别为−6.682 mm·(10a)$^{-1}$、−6.515 mm·(10a)$^{-1}$、−5.880 mm·(10a)$^{-1}$。

昆仑山北坡气温和降水在空间上存在差异，降水因地理位置的不同而有所变化，山脉和河流等地貌特征会影响空气的运动和水汽的凝结，从而影响降水的分布(图6a)。2001—2022年典型湖泊集水区年降水量以−2.241~3.352 mm·a^{-1}变化，阿牙克库木湖、阿其克库勒湖、鲸鱼湖，各自湖泊集水区内年降水量变化多呈增加变化趋势，增加区域面积占比分别为68.83%、83.33%、47.68%。长虹湖、阿克赛钦湖、萨利吉勒干南库勒湖，各自湖泊集水区内年降水多呈减少变化趋势，减少区域面积占比分别为80.32%、94.64%、95.51%。气温空间差异主要与高海拔地区的气候条件、辐射特性、地形起伏等有关(图6b)。2001—2022年典型湖泊集水区气温以−0.010~0.074 ℃·a^{-1}变化，气温上升区域面积占湖泊集水区的98.65%。

2.3.2 土地利用变化 2000、2020年典型湖泊集水区土地利用空间特征如图7所示，2000年典型湖泊集水区土地利用类型，仅草地、水域、未利用土地，2020年土地类型增加了耕地、林地及城乡、工矿、居民用地。2000—2020年典型湖泊集水区草地面积明显减少，水域面积明显增加，且未利用土地面积明显增加。

阿牙克库木湖集水区主要土地类型为草地、水域、未利用土地为主，2020年面积占比分别为19.12%、16.04%、64.84%，水域像元数由2000年的0.8×10^{6}增加到2020年的1.4×10^6，草地像元数在2000—2020年间减少了1.4×10^6(图8)。2020年鲸鱼湖集水区草地仅次于未利用土地，面积占比为44.65%，草地像元数2020年相对于2000年减少了39.49%，水域像

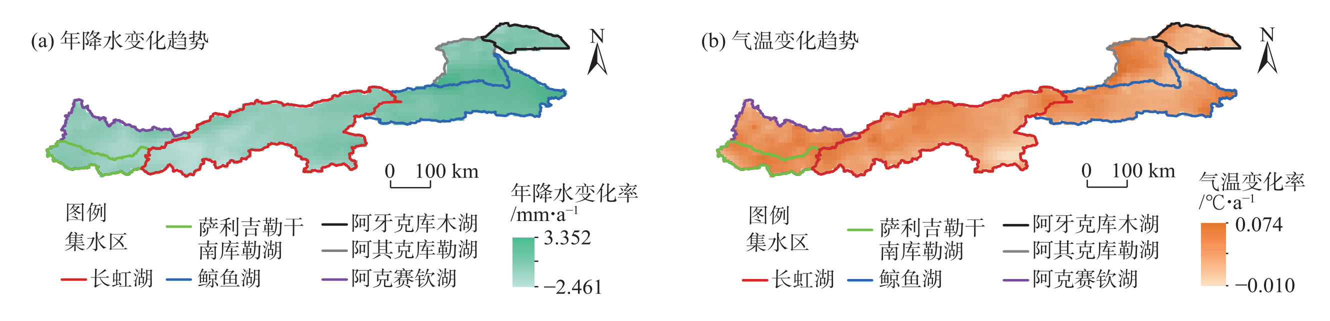


图6 2001—2022年湖泊集水区气候要素空间变化

Fig. 6 Spatial variations of climate factors in lake catchment areas from 2001 to 2022

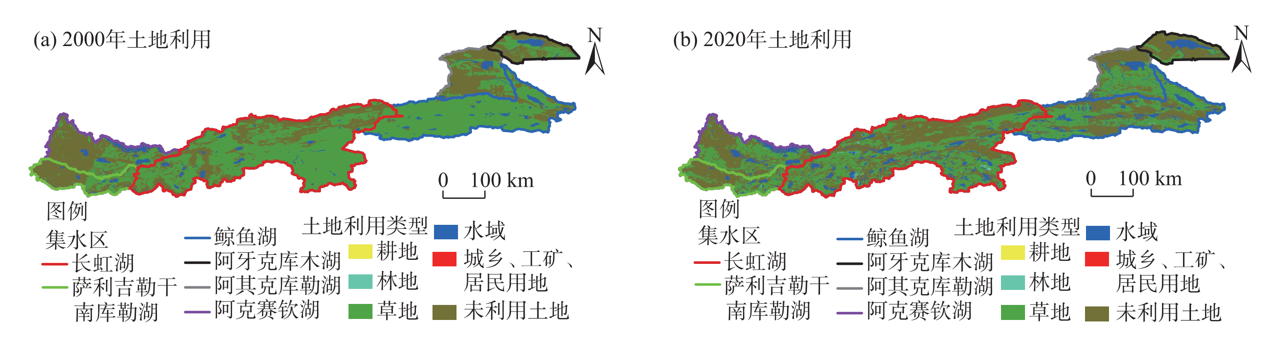


图7 2000、2020年湖泊集水区内土地利用时空特征

Fig. 7 Spatial and temporal characteristics of land use changes in lake catchment areas in 2000 and 2020

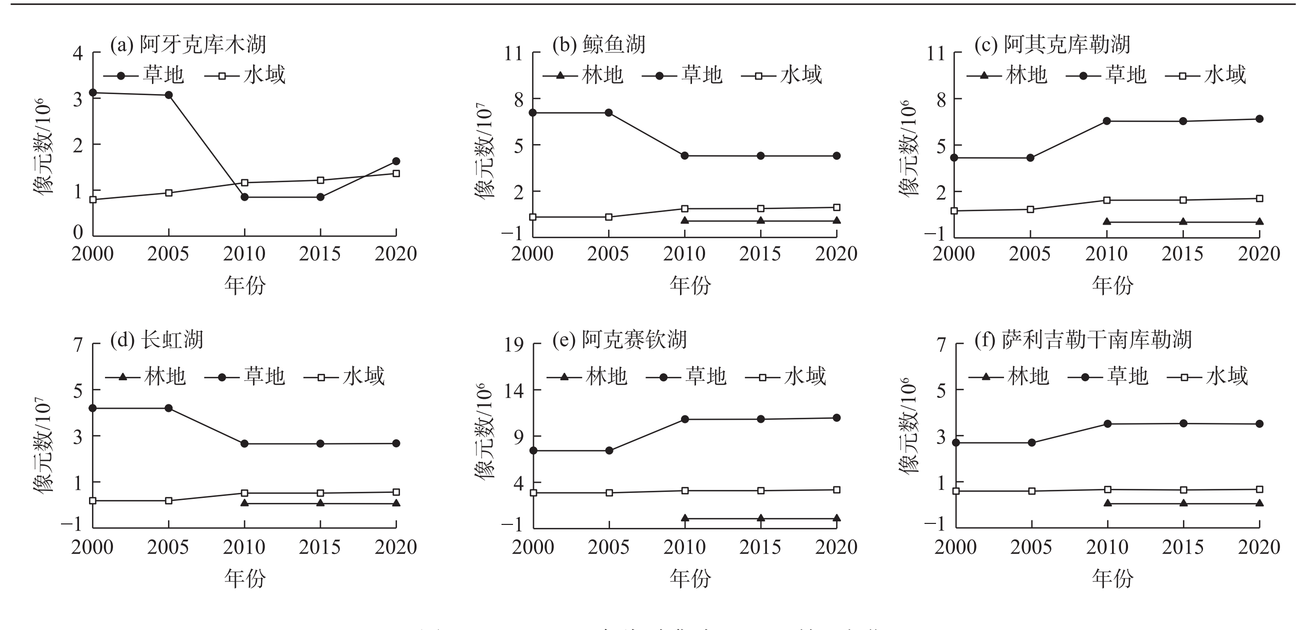


图8 2000—2020年湖泊集水区土地利用变化

Fig. 8 Land use changes in lake catchment areas from 2000 to 2020

元数2020年相对于2000年增加了近2倍。阿其克库勒湖集水区草地、水域像元数2020年相对2000年分别增加了$2.5×10^6$、$0.8×10^6$。长虹湖集水区草地、水域像元数变化与鲸鱼湖类似。2020年阿克赛钦湖集水区草地土地利用类型面积占比为37.05%，像元数增加了$3.5×10^6$，变化率47.65%，水域2000—2020年像元数变化率为10.94%。萨利吉勒干南库勒湖集水区草地、水域在2020年像元数分别为$3.5×10^6$、$6.7×10^5$，相比2000年的草地增加了30.14%、水域增加了12.42%。

2.4 相关性分析

采用Pearson相关性方法分析2003—2022年昆仑山北坡典型湖泊水位与集水区气候因素相关性(表3)。阿其克库勒湖、阿牙克库木湖、鲸鱼湖的湖泊水位与年降水量呈正相关，相关系数分别为0.19、0.08、0.15。阿克赛钦湖、阿其克库勒湖、阿牙克库木湖、长虹湖和鲸鱼湖水位与气温相关系数分别为0.15、0.24、0.11、0.05和0.10，显示出轻微的正相关关系；而萨利吉勒干南库勒湖水位与气温相关系数为-0.16，显示出轻微的负相关关系。

表3 湖泊水位与气候因子的相关性系数

Tab. 3 Correlation coefficients between lake water levels and climate factors

湖泊	降水	气温
阿克赛钦湖	−0.02	0.15
阿其克库勒湖	0.19	0.24
阿牙克库木湖	0.08	0.11
长虹湖	−0.20	0.05
鲸鱼湖	0.15	0.10
萨利吉勒干南库勒湖	−0.43	−0.16

3 讨论

高山区湖泊作为山区水资源的重要贮存库，其变化反映了气候变化对高山区域水资源的综合影响[25]。气候向暖湿化转变，气温与降水总体呈上升趋势，冰川退缩[26-27]，冻土中水分释放等增大了天山山区、喀喇昆仑湖泊的水源补给，使得该地区湖泊水量与湖泊面积都有所增大，水位也基本呈上升趋势，这与李晓峰等[28]、马山木等[29]研究中青藏高原湖泊水位上升变化趋势、昆仑山北麓湖泊面积扩张的趋势相似。昆仑山北坡海拔高度差较大，且居于欧亚大陆中心，水汽难以到达，造成降水的空间分布不均[30]。海拔相对高的迎风坡拦截了水汽，降水较为丰富，一定程度上利于处于山地的湖泊补充水源，水位上升。

全球变暖导致冰川、河冰、积雪加速消融，使高山冰川融水增多，高山冰川湖呈现新变化[31]。湖泊水位变化是多种因素共同作用的结果，其原因具有多样性和复杂性，如气温升高/降低(促使冰雪融水增大/减小)、降水以及蒸发增加/减少，上游冰川融水的增大/减少以及区域地形因素的影响都有可能

影响冰川湖的扩张速率。阿克赛钦湖、鲸鱼湖、长虹湖和阿其克库勒湖，湖泊补给的方式主要来源为暖季节高山带冰雪融水，其流域集水区分布有较为丰富的冰川（表4，冰川数据来源于第二次冰川目录），近20 a湖泊水位上升速率分别达0.29 $m\cdot a^{-1}$、0.57 $m\cdot a^{-1}$、0.71 $m\cdot a^{-1}$和0.55 $m\cdot a^{-1}$。相比较而言，湖泊集水区冰川面积较少或无冰川地区因为来自冰川融水较少，近20 a水位变化相比较冰川融水补给湖泊增加较缓，如阿牙克库木湖和萨利吉勒干南库勒湖其集水区域冰川面积较其他湖冰川面积偏小，因此缺少大量冰川融水补给，2003—2022年湖泊水位上升速率分别为0.40 $m\cdot a^{-1}$和0.03 $m\cdot a^{-1}$。

表4　昆仑山北坡典型湖泊信息概况

Tab. 4　Overview of typical lakes on the northern slope of Kunlun Mountains

湖泊	湖泊面积/km^2	湖泊水位/m	集水区冰川面积/km^2
阿克赛钦湖	235.20	4852.08	3091.23
阿牙克库木湖	912.01	3882.34	1.47
阿其克库勒湖	500.07	4259.16	233.99
鲸鱼湖	323.41	4718.56	938.83
长虹湖	51.82	4912.55	717.67
萨利吉勒干南库勒湖	68.63	5193.33	196.16

4　结　论

（1）提取的ICESat-1、CryoSat-2、EnviSat以及ICESat-2水位数据与参考水位数据集进行精度验证，湖泊水位变化趋势较为一致，相关性检验均通过F检验，其中阿牙克库木湖、阿克赛钦湖估计标准误差分别为0.34、0.19，水位数据较为可靠，鲸鱼湖、阿其克库勒湖估计标准误差分别为0.55、0.54。

（2）利用Mann-Kendall、F显著性检验方法对湖泊水位变化进行趋势分析，除萨利吉勒干南库勒湖外，均呈现显著上升趋势，其中长虹湖水位速率变化最大，以0.71 $m\cdot a^{-1}$的速率上升，阿其克库勒水位变化幅度最大，2003—2022年水位上升了10.14 m。

（3）2001—2022年典型湖泊集水区内气温变化、降水时空变化存在差异，气温呈增加趋势，其中萨利吉勒干南库勒湖升温速率最高，以0.355 ℃·$(10a)^{-1}$的速率上升且气温最低为−10.457±0.757 ℃，阿牙克库木湖气温最高为−3.816±0.532 ℃；降水量时空变化差异较大，阿牙克库木湖、鲸鱼湖、阿其克库勒湖降水呈增加趋势。

（4）2000—2020年典型湖泊集水区土地利用类型以未利用土地、水域、草地为主，水域像元均呈现增加趋势，草地类型在阿其克库勒湖、阿克赛钦湖、萨利吉勒干南库勒湖像元数增加。

参考文献（References）

[1] 白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975—2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 80-88. [Bai Jie, Chen Xi, Li Junli, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975—2007: A remote-sensing analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 80-88.]

[2] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 799-810. [Yang Guishan, Ma Ronghua, Zhang Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(6): 799-810.]

[3] Heino J, Alahuhta J, Bini L M, et al. Lakes in the era of global change: Moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services[J]. Biological Reviews, 2021, 96(1): 89-106.

[4] 韩飞, 刘铁, 黄粤, 等. 高山湖泊生态系统气候响应研究进展[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 233-242. [Han Fei, Liu Tie, Huang Yue, et al. Advance in the studies of responses of alpine lakes to climate change[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 233-242.]

[5] Yan L J, Zheng M P. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973—2010[J]. Geomorphology, 2015, 246: 68-78.

[6] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003—2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1219-1229. [Li Junli, Chen Xi, Bao Anming. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003—2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1219-1229.]

[7] 郭清, 王兴泽. 超声波水位测量系统[J]. 东北水利水电, 1999(2): 39-40, 16, 49. [Guo Qing, Wang Xingze. Water level measure system by ultrasonic wave[J]. Water Resources & Hydropower of northeast China, 1999(2): 39-40, 16, 49.]

[8] 赵建虎, 周丰年, 张红梅. 船载GPS水位测量方法研究[J]. 测绘通报, 2001(增刊1): 1-3. [Zhao Jianhu, Zhou Fengnian, Zhang Hongmei. Research on method of determining tide on water with GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2001(Suppl. 1): 1-3.]

[9] 李振南, 雷伟伟, 王一帆, 等. 基于多源卫星测高数据的青海湖水位变化研究[J]. 测绘科学, 2023, 48(5): 140-151. [Li Zhennan, Lei Weiwei, Wang Yifan, et al. Water level variation of Qinghai Hu based on multi-source satellite altimetry data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(5): 140-151.]

[10] 刘军彦, 王世杰. 基于ICESat-2卫星测高数据的呼伦湖水位变

化监测[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1438-1445. [Liu Junyan, Wang Shijie. Monitoring of water level change in Hulun Lake based on ICESat-2 satellite altimetry data[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1438-1445.]

[11] 唐新明, 李国元. 激光测高卫星的发展与展望[J]. 国际太空, 2017(11): 13-18. [Tang Xinming, Li Guoyuan. Development and prospect of laser altimetry satellite[J]. Space International, 2017(11): 13-18.]

[12] Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B. Improvements in mountain lake monitoring from satellite altimetry over the past 30 years-lessons learned from Tibetan lakes[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 295: 113702, doi: 10.1016/j.rse.2023.113702.

[13] Xu F L, Zhang G Q, Yi S, et al. Seasonal trends and cycles of lake-level variations over the Tibetan Plateau using multi-sensor altimetry data[J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127251, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127251.

[14] 田时岳, 王昶, 何佳洋, 等. 基于ICESat-2激光测高数据的鄱阳湖水位序列构建及水位预测[J]. 测绘科学, 2023, 48(12): 105-114. [Tian Shiyue, Wang Chang, He Jiayang, et al. Water level sequence construction and water level prediction of Poyang Lake based on ICESat-2 laser altimetry data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(12): 105-114.]

[15] 高晓宇, 郝海超, 张雪琪, 等. 中国西北干旱区植被水分利用效率变化对气象要素的响应——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1111-1120. [Gao Xiaoyu, Hao Haichao, Zhang Xueqi, et al. Responses of vegetation water use efficiency to meteorological factors in arid areas of northwest China: A case of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1111-1120.]

[16] 张元梅, 孙桂丽, 鲁艳, 等. 昆仑山北坡两种优势荒漠灌木的生物量预测模型[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 284-292. [Zhang Yuanmei, Sun Guili, Lu Yan, et al. Biomass estimation models for two dominant desert shrubs on the northern slopes of Kunlun Mountain[J]. Arid Land Geography, 2024, 41(2): 284-292.]

[17] Li X D, Long D, Huang Q, et al. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000—2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1603-1627.

[18] 袁康, 谭德宝, 文雄飞, 等. 库赛湖水位动态监测及气候要素分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(2): 153-158. [Yuan Kang, Tan Debao, Wen Xiong fei, et al. Dynamic monitoring of water level change in Kusai Lake and analysis of climatic driving forces[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(2): 153-158.]

[19] 彭海月. 青藏高原湖泊水位序列构建与变化分析[D]. 西宁: 青海大学, 2022. [Peng Haiyue. Construction and variation analysis of lake water level series in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xining: Qinghai University, 2022.]

[20] 陈健茹, 徐佳, 王冬梅. 基于多源卫星数据的高邮湖长时序水位变化监测[J]. 人民长江, 2024, 55(1): 120-126. [Chen Jianru, Xu Jia, Wang Dongmei. Long time series monitoring of water level change in Gaoyou Lake based on multi-source satellite data[J]. Yangtze River, 2024, 55(1): 120-126.]

[21] 廖静娟, 赵云, 陈嘉明. 基于多源雷达高度计数据的高亚洲湖泊水位变化数据集[J]. 中国科学数据, 2020, 5(1): 140-151. [Liao Jingjuan, Zhao Yun, Chen Jiaming. A dataset of lake level changes in High Mountain Asia using multi-altimeter data[J]. China Scientific Data, 2020, 5(1): 140-151.]

[22] 段伟利, 邹珊, 陈亚宁, 等. 1879—2015年巴尔喀什湖水位变化及其主要影响因素分析[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 950-961. [Duan Weili, Zou Shan, Chen Yaning, et al. Analysis of water level changes in Lake Balkhash and its main influencing factors during 1879—2015[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 950-961.]

[23] 李想, 张雪芹, 徐晓明. 近40年来贝加尔湖区气候变化及其对湖泊水位的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 219-231. [Li Xiang, Zhang Xueqin, Xu Xiaoming. Climate change and its effects on the water level of Lake Baikal region since the 1980s[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 219-231.]

[24] Cohen I, Huang Y, Chen J, et al. Pearson correlation coefficient[J]. Noise Reduction in Speech Processing, 2009: 1-4, doi: 10.1007/978-3-642-00296-0_5.

[25] Zhang Q F, Chen Y N, Li Z, et al. Why are glacial lakes in the eastern Tianshan Mountains expanding at an accelerated rate?[J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(1): 121-150.

[26] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountians, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[27] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(6): 535-543. [Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, et al. Recent retreat of high Asian glaciers and its impact on water resources in northwest China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2004, 34(6): 535-543.]

[28] 李晓锋, 姚晓军, 孙美平, 等. 2000—2014年我国西北地区湖泊面积的时空变化[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 96-104. [Li Xiaofeng, Yao Xiaojun, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal variations in lakes in northwest China from 2000 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 96-104.]

[29] 马山木, 甘甫平, 吴怀春, 等. ICESat-2数据监测青藏高原湖泊2018—2021年水位变化[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 164-172. [Ma Shanmu, Gan Fuping, Wu Huaichun, et al. ICESat-2 data-based monitoring of 2018—2021 variations in the water levels of lakes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 164-172.]

[30] 江远安, 刘精, 邵伟玲, 等. 1961—2013年新疆不同时间尺度降水量的气候特征及其历史演变规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1363-1375. [Jiang Yuanan, Liu Jing, Shao Weiling, et al. Climatic

characteristics and historical evolution of precipitation in different time scales in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1363-1375.]

[31] Wang Y T, Hou S G, Huai B J, et al. Glacier anomaly over the western Kunlun Mountains, northwestern Tibetan Plateau, since the 1970s[J]. Journal of Glaciology, 2018, 64(246): 624-636.

Water level changes and attribution of typical lakes on the northern slope of Kunlun Mountains from 2003 to 2022

LIU Yuting[1], CHEN Yaning[2], ZHU Chenggang[2], ZHANG Shuhua[3], HUANG Xinyao[1]

(1. School of Life and Geography, Kashi University/Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi 844000, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Changes in water level serve as crucial indicators of dynamic variations in lake systems, significantly impacting lake ecological environments and water resource management. This study employs data from ICESat-1, CryoSat-2, EnviSat, and ICESat-2 multi-source altimetry satellites to analyze water levels of Aksai Chin Lake, Ayagkumu Lake, Aqqikkol Lake, Jingyu Lake, Changhong Lake, and Surigh Yilganing Kol Lake on the northern slope of Kunlun Mountains. It also incorporates data on lake watershed areas, temperature, precipitation, and land use from 2003 to 2022. Quantitative analyses of lake water level changes were conducted using trend analysis, Mann-Kendall test, Pearson correlation, and other methods to explore the influencing mechanisms of these changes. The findings are as follows: (1) The accuracy of water levels derived from multiple altimetry satellites was validated against the water level dataset, showing consistent trends and passing the significance F test in all correlation analyses. (2) Over the past 20 years, water levels of the lakes, except for Surigh Yilganing Kol Lake, have shown a significant upward trend, with Changhong Lake exhibiting the highest rate of increase at 0.71 $m \cdot a^{-1}$, while Aksai Chin Lake has the lowest rate of increase at 0.29 $m \cdot a^{-1}$. (3) Climatic factors differ significantly across lake catchment areas, with temperatures showing a consistent rising trend and precipitation varying across regions. A positive correlation exists between water levels and precipitation for Aqqikkol Lake, Ayagkumu Lake, and Jingyu Lake, while water levels of typical lakes show a positive correlation with temperature, except for Surigh Yilganing Kol Lake. This study leverages data from multiple altimetry satellites to analyze lake water level changes, aiming to elucidate the hydrological variations of lakes on the northern slope of the Kunlun Mountains. The findings provide a scientific basis for the management of lake ecological environments.

Key words: satellite altimetry; lake water level; temperature; precipitation; land use; northern slope of Kunlun Mountains